

## 整体网格壁板滚弯成形工艺研究

罗天龙, 钱应平, 陈 亮, 王子豪

(湖北工业大学 机械工程学院 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 针对整体网格壁板滚弯成形质量差的问题, 研究了不同工艺参数对于整体网格壁板滚弯成形质量的影响。以 2219 铝合金为研究对象, 基于整体网格壁板滚弯成形原理, 建立了下压量与滚弯半径的数学模型, 其预测半径与目标半径误差不超过 2.4%。利用 ABAQUS 软件建立了有限元模型, 针对不同摩擦力、进给速度以及筋宽厚比进行模拟仿真。结果表明: 随着摩擦力和进给速度的增加, 整体网格壁板滚弯成形质量降低; 随着筋宽厚比的增加, 整体网格壁板滚弯成形质量提高。最后, 对有限元模型进行了实验验证, 实验数据与有限元模型拟合度较高, 仿真与实验误差不超过 7.48%。

**关键词:** 整体网格壁板; 2219 铝合金; 滚弯成形; 成形质量; 数学模型

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.006

**中图分类号:** V461 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0037-11

## Research on roll bending process of integral mesh panel

Luo Tianlong, Qian Yingping, Chen Liang, Wang Zihao

(Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor roll bending quality of integral mesh panel, the impact of different process parameters on the roll bending quality of integral mesh panel was studied. Taking 2219 aluminum alloy as the research object, the mathematical model of press amount and roll bending radius was established based on the roll bending principle of integral mesh panel, and the error between the predicted and target radiuses is not more than 2.4%. Using ABAQUS software to establish a finite element model, for different friction forces, feeding speed and width-to-thickness ratio of rib, the simulation was conducted. The results show that with the increasing of friction forces and feeding speed, the roll bending quality of integral mesh panel decreases, with the increasing of width-to-thickness ratio of rib, the roll bending quality of integral mesh panel increases. Finally, the finite element model was experimentally verified, and a good fit between the experimental data and the finite element model is obtained, and the error between simulation and experiment is not more than 7.48%.

**Key words:** integral mesh panel; 2219 aluminum alloy; roll bending; forming quality; mathematical model

随着航天工业的发展, 高筋薄壁蒙皮壁板的需求越来越大, 成形缺陷控制难度也越来越大, 因此, 对壁板成形工艺提出了更高要求<sup>[1]</sup>。网格整体壁板的蒙皮与加强筋为一个整体, 结构较为复杂, 与传统的铆接、焊接相比, 筋条直接参与到成形过程中, 因此, 制造工艺复杂、制造周期长<sup>[2]</sup>。并且由于网格整体壁板的特殊结构, 在成形时往往会出现成形质量差、筋条出现断裂、失稳等问题。为解

决上述问题, 国内外学者提出了许多不同的成形方法和成形工艺。

目前, 常见的整体壁板的成形方法主要有: 增量压弯成形、蠕变时效成形、喷丸成形和滚弯成形等<sup>[3-5]</sup>。但是, 增量压弯成形整体壁板的成形周期长、成形效率低, 而蠕变时效成形以及喷丸成形在制备大型整体壁板时需配套相应的大型成形设备, 导致加工成本高。滚弯成形相对于其他常用的成形方法具有设备简单、操作方便、生产效率高等优点, 被广泛运用于整体壁板的弯曲成形中。许多学者对整体壁板滚弯成形展开了研究。Xiao H 等<sup>[6]</sup>提出了整体壁板填料滚弯成形工艺, 通过实验和数值模拟的方法验证了填料可以改善整体壁板滚弯成形的均匀性。肖寒等<sup>[7-9]</sup>研究了塑料和橡胶填料辅助整体壁板滚弯成形以及筋条外置填料滚弯成形工艺, 证

收稿日期: 2024-12-04; 修订日期: 2025-03-14

基金项目: 湖北省厅重大专项 (2020BAB037); 湖北省技术创新专项 (2022BEC022)

作者简介: 罗天龙 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1360354336@qq.com

通信作者: 钱应平 (1970-), 男, 博士, 教授

E-mail: qianyp98@163.com

明了塑料和橡胶填料可以有效改善壁板的受力情况,起到保护筋条的作用,并讨论了滚弯成形中压下量对壁板筋条的影响和蒙皮弧高值对筋条外置填料的影响。Li H W 等<sup>[10]</sup>研究了以聚丙烯为填料的 2A12 铝合金整体壁板滚弯成形工艺,通过数值模拟和实验等方法,揭示了填料在滚弯成形中的作用。赖松柏等<sup>[11]</sup>基于动力显式有限元方法研究了整体填料辅助滚弯成形分析方法,给出了确定虚拟加载速度的准则。

综上所述,目前对于整体网格壁板滚弯成形的研究主要集中在填料工艺以及结构优化上,而加工工艺参数对于整体网格壁板滚弯成形质量影响的研究较少。针对上述问题,本文以 2219 高强度铝合金为研究对象,通过 ABAQUS 仿真模拟及实验验证的方法,以成形半径、筋变形量以及母线直线度作为判断成形质量的依据,研究摩擦力、进给速度以及筋宽厚比对整体网格壁板滚弯成形质量的影响。

## 1 整体网格壁板滚弯成形原理及下压量确定

### 1.1 整体网格壁板滚弯成形原理

本文采用的设备为水平推动上调式三辊卷板机,

其滚弯成形过程为两下辊同步位移进行预弯、卸载等工艺流程,将其等效为上辊位移以便后续的理论计算以及有限元模拟。整体网格壁板的滚弯成形工艺流程一般为:对中、预弯、滚弯以及卸载等。在正式滚弯之前需进行对中,将壁板放置在上下辊之间,并且令壁板的顶边与左下辊母线对齐,保证壁板滚弯时母线与辊轴线平行,防止产生扭斜从而对最终成形精度产生影响。如图 1a 所示,将壁板放置在两下辊上方,手动调整壁板对中,令壁板与挡板垂直。对中结束后需对壁板进行预弯,壁板的预弯半径直接决定了滚弯成形的最终曲率半径,壁板的预弯工艺既可以消除剩余直边,也可使壁板获得一个初始曲率,使壁板在该初始曲率下通过上辊提供的扭矩进行连续滚弯,如图 1b 所示,卷板机通过上辊下压对壁板进行预弯,使壁板获得初始半径。在壁板完成对中以及预弯之后,壁板通过上下辊提供扭矩使壁板连续滚弯成形,如图 1c 所示,壁板通过一次进给的方式跟随上辊旋转方向进行滚弯成形。滚弯成形结束后,将辊子调整至初始位置进行卸载,逐步卸载壁板下压部分的载荷,以便继续后续工作,如图 1d 所示,通过上辊上移来进行滚弯成形的卸载。

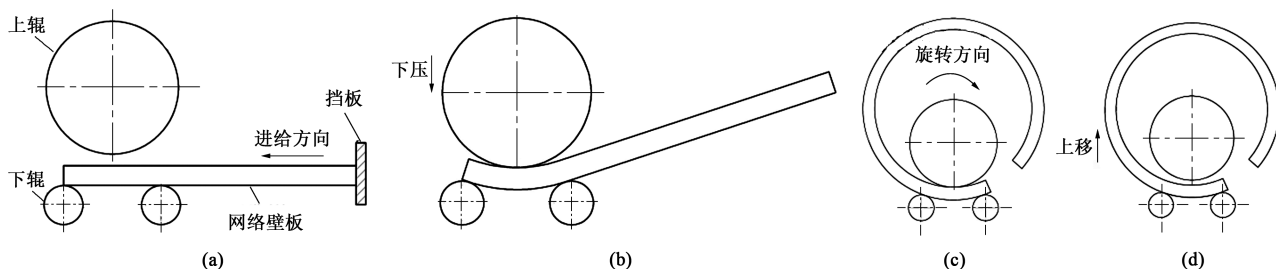


图 1 整体网格壁板滚弯成形工艺流程示意图

(a) 对中 (b) 预弯 (c) 滚弯 (d) 卸载

Fig. 1 Schematic diagram of roll bending process flow for integral mesh panel

(a) Alignment (b) Prebending (c) Roll bending (d) Unloading

整体网格壁板滚弯成形原理示意图如图 2 所示,其中,  $B$ 、 $C$  为下辊与壁板的接触点,  $A$  与  $A_1$  分别为滚弯前后上辊与壁板的接触点。壁板在  $B$  和  $C$  之间为滚弯区,滚弯完成的壁板经过  $B$  后进入卸载区。

### 1.2 下压量的确定

在实际生产过程中,一般需要将壁板滚弯至特定的成形半径,而滚弯成形半径是由预弯半径直接确定的,因此,确定合适的上辊下压量便可滚弯成形出符合要求的成形半径,从而提高滚弯成形精度,避免材料的浪费。如图 3 所示,  $O$  为滚弯圆心,  $D_1$  为上辊直

径, mm。根据壁板滚弯几何模型以及勾股定理可得出:

$$\left(\frac{h}{2}\right)^2 + \left(R + t + \frac{D_2}{2} - p\right)^2 = \left(R + \frac{D_2}{2} + t\right)^2 \quad (1)$$

式中:  $h$  为两下辊之间的间距, mm;  $R$  为滚弯半径, mm;  $t$  为壁板厚度, mm;  $p$  为上辊下压量, mm;  $D_2$  为下辊直径, mm。

整理后可以得到上辊下压量  $p$  与滚弯半径  $R$  的关系式:

$$p = R + \frac{D_2}{2} + t - \sqrt{\left(R + \frac{D_2}{2} + t\right)^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} \quad (2)$$

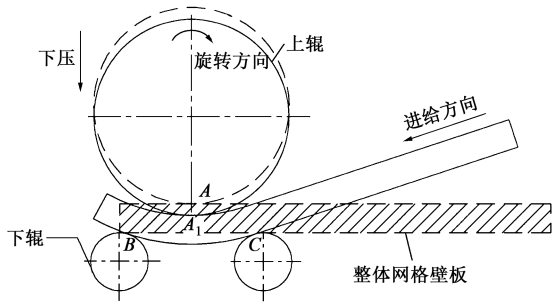


图2 整体网格壁板滚弯成形原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of roll bending principle for integral mesh panel

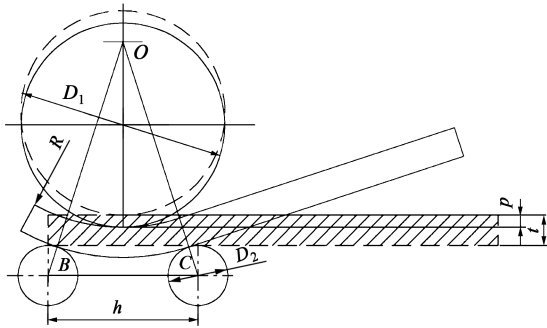


图3 整体网格壁板滚弯成形几何模型

Fig. 3 Geometry model of roll bending for integral mesh panel

当壁板滚弯完成后进行卸载时会产生回弹，因此，式（2）只适用于不考虑回弹的情况，用于指导实际生产时精度较低，因此，必须建立考虑回弹的数学模型。通过文献 [12] 和文献 [13] 可知，用于计算回弹的理论模型为：

$$R_1 = \frac{1 - \frac{K_0 R_{eL}}{E}}{1 + \frac{2RK_1 R_{eL}}{Et}} \cdot R \quad (3)$$

式中： $R_1$  为回弹前滚弯半径，mm； $K_0$  为材料相对强化系数； $R_{eL}$  为材料屈服强度，MPa； $E$  为杨氏模量，MPa； $K_1$  为壁板截面形状系数。

将式（3）代入式（2）中，可得到考虑回弹情况下的上辊下压量与滚弯半径之间的关系：

$$p = \frac{1 - \frac{K_0 R_{eL}}{E}}{1 + \frac{2RK_1 R_{eL}}{Et}} \cdot R + \frac{D_2}{2} + t - \sqrt{\left( \frac{1 - \frac{K_0 R_{eL}}{E}}{1 + \frac{2RK_1 R_{eL}}{Et}} \cdot R + \frac{D_2}{2} + t \right)^2 - \left( \frac{h}{2} \right)^2} \quad (4)$$

将 2219 铝合金的参数代入式（4）中，可以计算出壁板滚弯半径与上辊下压量的对应关系，本文中所需的目标半径为 40 mm，对应的上辊下压量为 1.545 mm，常见的滚弯半径与上辊下压量的对应关系如表 1 所示。

表1 2219 铝合金滚弯半径与上辊下压量的对应关系

Table 1 Relationship between roll bending radius and press amount of upper roller for 2219 aluminum alloy

滚弯半径/mm	40	50	60	70	80
上辊下压量/mm	1.545	1.332	1.179	1.062	0.977

将计算出的上辊下压量代入到目标半径为 40 mm 的有限元模型中进行模拟，得到滚弯半径如图 4 所示，仿真预测的成形半径与目标半径误差不超过 2.4%，说明该数学模型适用于整体网格壁板滚弯成形上辊下压量的计算。

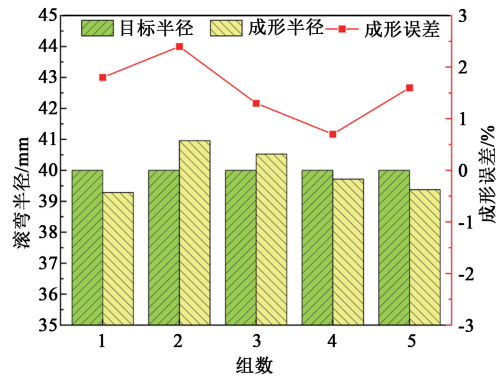


图4 成形半径与目标半径误差

Fig. 4 Errors between formed and target radiuses

## 2 整体网格壁板滚弯成形有限元模型

### 2.1 壁板三维模型

使用 UG 三维建模软件对壁板进行建模，为了提高有限元模型计算精度和计算效率，取消网格内部圆角，设计壁板尺寸及标准模型如图 5 所示。壁板长度为 250 mm，宽度为 100 mm，厚度为 3.5 mm；网格长度为 32 mm，宽度为 16 mm，筋高为 1.5 mm，筋宽为 6 mm，网格数量为 4×6。将其导入 ABAQUS 有限元分析软件进行仿真分析。

### 2.2 有限元模型的建立

2219 铝合金的化学成分如表 2 所示。为了提高有限元模型的可靠性，需对材料进行单向拉伸实验获得相应的应力-应变曲线填入到有限元模型中。2219 铝合金的应力-应变曲线如图 6 所示。分析单向拉伸数据即可得到 2219 铝合金的物理参数，如表 3 所示。

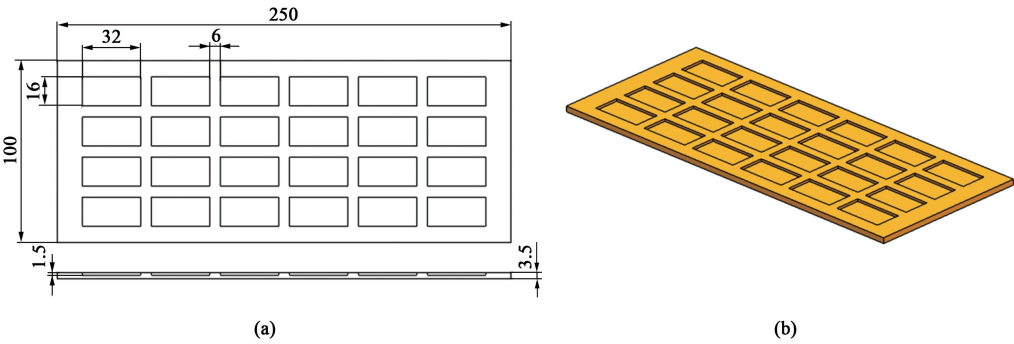


图5 壁板尺寸 (a) 与标准三维模型 (b)

Fig. 5 Dimensions (a) and standard 3D model (b) for panel

表 2 2219 铝合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of 2219 aluminum alloy (%, mass fraction)

Cu	Ti	Cr	Mg	Si	V	Fe	Zn	Mn	Zr	Al
5.8	0.1	0.1	0.02	0.2	0.05	0.3	0.1	0.4	0.1	余量

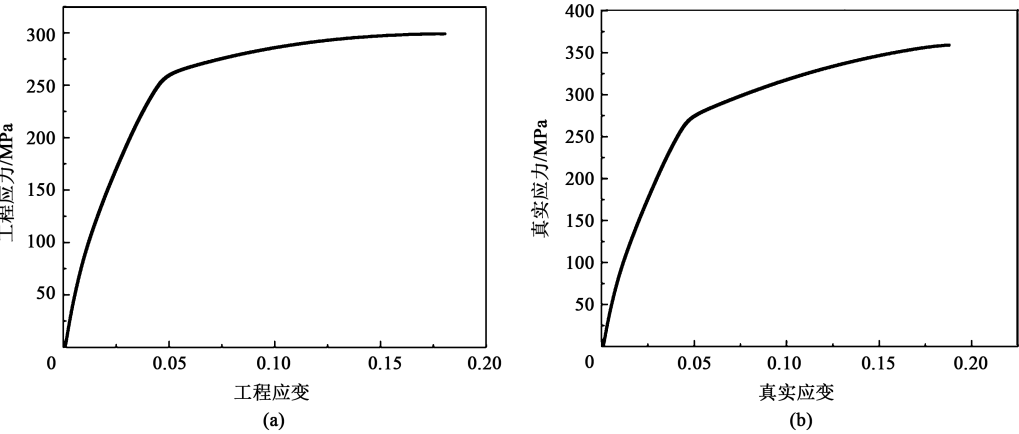


图6 2219 铝合金的应力-应变曲线

(a) 工程应力-工程应变 (b) 真实应力-真实应变

Fig. 6 Stress-strain curves of 2219 aluminum alloy

(a) Engineering stress-engineering strain (b) True stress-true strain

表 3 2219 铝合金的物理参数

Table 3 Physical parameters of 2219 aluminum alloy

参数	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	泊松比	密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	相对强化系数	截面形状系数
数值	73000	260	0.33	$2.77 \times 10^3$	14	1.5

在实际滚弯成形中直接参与成形的只有上下辊以及壁板,为了兼顾壁板滚弯成形工艺以及有限元模型计算效率,有限元模型只包括上辊、两下辊以及壁板,并且将两下辊同步上移等效为上辊下压。由于辊子在滚弯过程中几乎不发生变形,因此,将其设置为解析刚体。卷板机参数如表 4 所示,按照表 4 所提供的尺寸装配有限元模型,

如图 7 所示。

表 4 卷板机参数 (mm)

Table 4 Parameters of coiler (mm)

参数	上辊直径 $D_1$	下辊直径 $D_2$	下辊间距 $h$	上、下辊高度
数值	$\Phi 68$	$\Phi 20$	24	180

为了提高计算精度,需将壁板进行区域划分

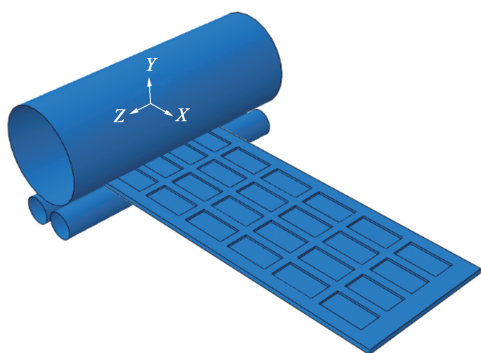


图7 整体网格壁板滚弯成形有限元模型

Fig.7 Finite element model of roll bending for integral mesh panel

才可以统一使用均匀性最高的六面体网格, 选择标准线性单元 C3D8R, 并且为了更好地观察筋条变形情况, 针对筋条上的网格进行了局部网格细化, 最终划分 17184 个网格单元。有限元模型分析步共分为 3 步: 第 1 步为上辊下压来模拟预弯; 第 2 步为上辊主动旋转带动壁板以及下辊转动来模拟滚弯过程; 第 3 步为卸载壁板载荷来模拟卸载回弹过程。预弯结束时与滚弯结束时的等效应力云图如图 8 所示, 最大应力以及应力分布的改变说明壁板的滚弯成形过程是同时加载并且同时卸载的过程。

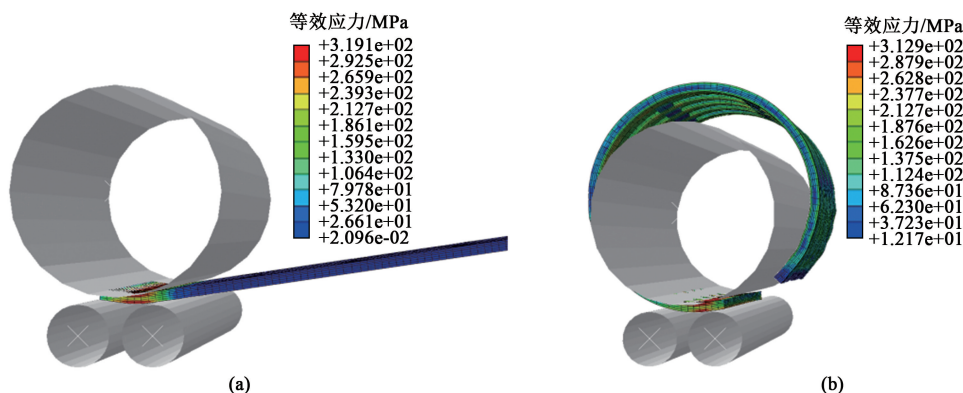


图8 预弯结束 (a) 和滚弯结束 (b) 时的等效应力云图

Fig.8 Equivalent stress nephograms at end of prebending (a) and roll bending (b)

ABAQUS 有限元计算中有两大算法: 显式算法和隐式算法<sup>[14]</sup>。壁板的滚弯成形过程是高度非线性的过程, 壁板与辊子之间不断接触产生相对滑动和脱离, 利用显式算法求解可以有效避免收敛问题。卸载回弹过程的非线性程度不高, 为了提高仿真精度和效率, 第 3 个分析步采用隐式算法模拟壁板卸载过程。卸载前与卸载后的等效应力云图如图 9 所示, 卸载前最大等效应力为 312.9 MPa, 卸载后最大等效应力为 289.4 MPa, 因此, 卸载阶段为壁板应力释放过程。

### 3 工艺参数对整体网格壁板滚弯成形质量的影响

基于所建立的有限元模型研究摩擦力、进给速度以及筋宽厚比对壁板成形质量的影响, 通过壁板滚弯半径、筋条变形量以及母线直线度来判断其成形质量。

#### 3.1 摩擦力对成形质量的影响

在壁板滚弯成形中, 壁板通过表面与上下辊的

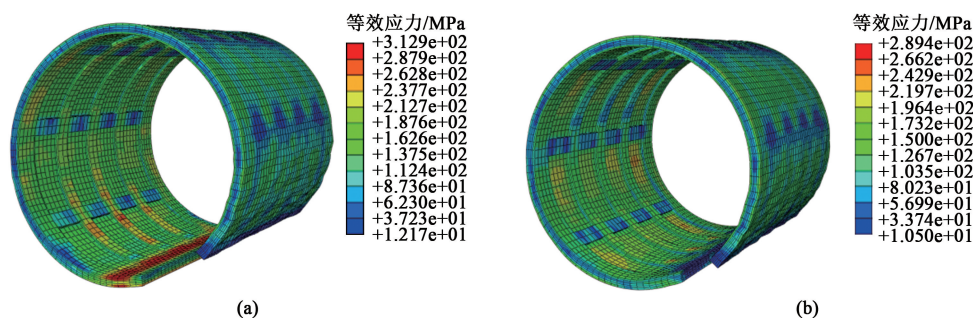


图9 卸载前 (a) 和卸载后 (b) 的等效应力云图

Fig.9 Equivalent stress nephograms before unloading (a) and after unloading (b)

摩擦力沿进给方向进行滚弯,在实际生产中,实际工况以及壁板和辊子的材料性质等会造成摩擦力的不同。在理想状态下,摩擦力主要通过变换上辊下压量来改变,下压量越大摩擦力也越大。为了研究在其他因素不变的情况下摩擦力对成形质量的影响,由摩擦力公式(式(5))可知,可通过改变摩擦因数的方式来改变等效摩擦力,从而不改变上辊下压力,即在不改变下压量的情况下进行研究。

$$F = \mu F_N \quad (5)$$

式中:  $F$  为等效摩擦力, N;  $\mu$  为摩擦因数;  $F_N$  为上辊下压力, N。

为了研究不同摩擦力对整体网格壁板成形质量的影响,需在有限元模型中设置不同的摩擦因数,当摩擦因数过小时会出现打滑现象。图 10 为摩擦因数为 0.1 时的等效应力云图,可看出最大等效应力仅为 274 MPa,明显小于正常滚弯成形的最大等效应力,造成打滑的原因是由于摩擦力提供的扭矩不够。

综上,在不打滑的情况下分别设置 5 组等差的

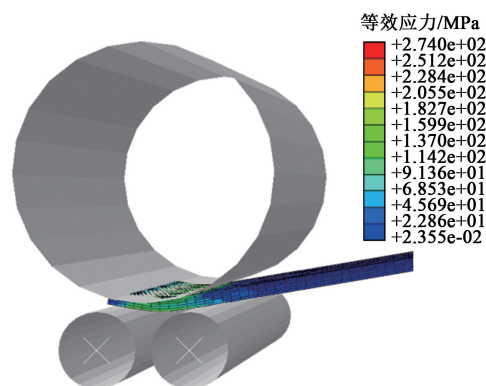


图 10 滚弯打滑的等效应力云图

Fig. 10 Equivalent stress nephogram of slipping during roll bending

摩擦因数 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 进行仿真模拟,目标半径为 40 mm。摩擦力对成形半径的影响如图 11a 所示。仿真结果显示:成形半径最大时(40.96 mm)的摩擦因数为 0.2;成形半径最小时(38.68 mm)的摩擦因数为 0.6。显然,随着摩擦力的增大,壁板成形半径随之减小,这是由于增大摩擦力会导致壁板承受更大的附加应力,而这些附加应力会产生

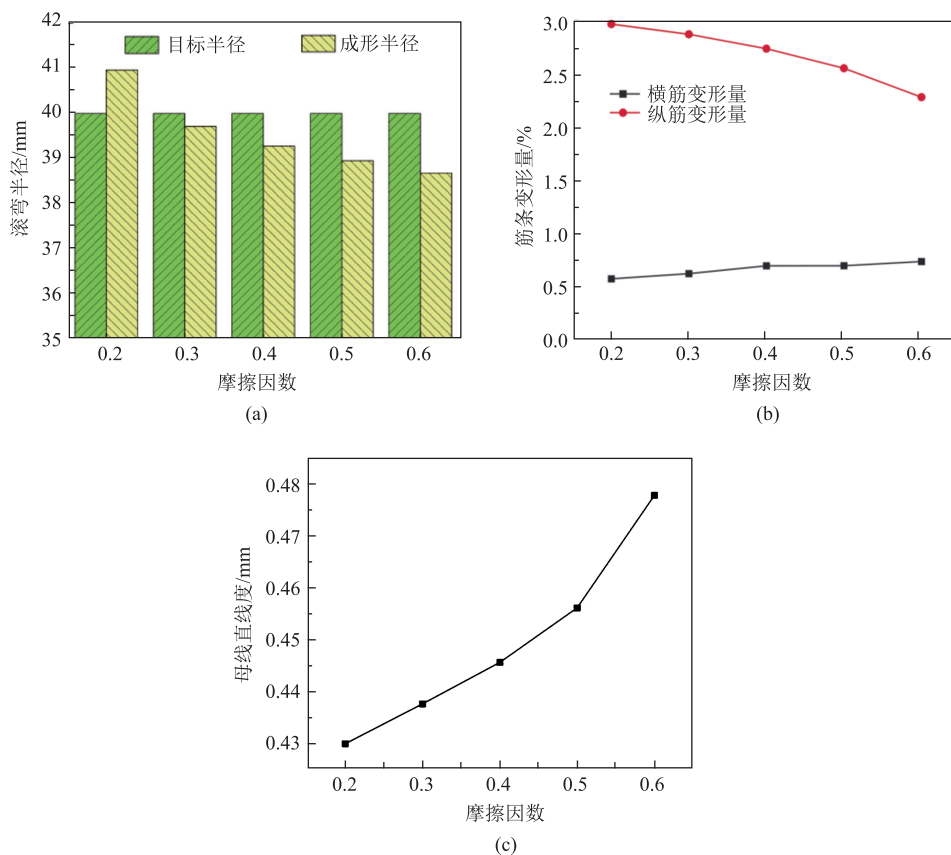


图 11 摩擦力对成形质量的影响

(a) 成形半径 (b) 筋条变形量 (c) 母线直线度

Fig. 11 Influence of friction force on forming quality

(a) Forming radius (b) Deformation amount of rib (c) Busbar straightness

局部应变集中, 导致整体成形半径变小。

筋条变形量  $\lambda$  即为筋条滚弯成形前后的变形程度, 可以由式 (6) 计算得出:

$$\lambda = \left| \frac{W_0 - W_1}{W_0} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $W_0$  和  $W_1$  分别为滚弯前后的筋条宽度, mm。

滚弯前筋条宽度为 6 mm。摩擦力对筋条变形量的影响如图 11b 所示。横筋变形量明显小于纵筋变形量, 这是因为纵筋沿着滚弯进给方向成形, 而横筋垂直于进给方向成形, 因此, 纵筋主要承受轴向应力, 而横筋主要承受剪切应力会产生较大的变形。从图 11b 中可看出, 随着摩擦因数的增大, 纵筋变形量呈下降趋势, 而横筋变形量呈上升趋势。这是因为摩擦力增大导致纵筋进给方向所受自由度降低, 约束了纵筋的变形; 而横筋所受剪切应力增大, 导致横筋变形量增大。因此, 增大摩擦力可以略微减小纵筋变形量、增大横筋变形量。

母线直线度是限制实际直线对理想直线变动量的一种形状公差, 母线直线度越小说明壁板成形质量越好。测量壁板不同摩擦因数下同一位置的母线直线度, 得出摩擦力与母线直线度的关系曲线如图 11c 所示。随着摩擦力的增大, 母线直线度也随之增大。这是因为: 增大摩擦力导致壁板在滚弯过程中所受的等效应力增大, 由于网格壁板的型腔结构会导致蒙皮和筋条受力不均匀程度变大, 从而导致母线直线度增加。

综上所述, 随着摩擦因数从 0.2 增大至 0.6, 整体网格壁板的成形半径减小了 5.57%, 横筋变形量增大了 0.16%、纵筋变形量减小了 0.68%, 母线直线度增大了 11.14%, 并且壁板应力集中现象更

严重, 增大了筋条出现断裂、失稳等缺陷的可能性。因此, 摩擦力越大, 整体网格壁板的滚弯成形质量越低。在实际生产中应该在保证壁板滚弯成形不打滑的情况下选择较小的摩擦力, 做好设备的润滑工作。

### 3.2 进给速度对成形质量的影响

Chung W J 等<sup>[15]</sup>和赖松柏等<sup>[11]</sup>建议将动态影响误差  $e(x)$  作为显式算法判断准静态问题的标准:

$$e(x) = \frac{1}{W_{int}(x)} \int_0^x \int_{\Omega} dE_k = \frac{E_k(x)}{W_{int}(x)} \quad (7)$$

式中:  $W_{int}$  为壁板的内能, J;  $E_k$  为壁板的动能, J;  $\Omega$  为壁板的体积,  $\text{mm}^3$ ;  $x$  为分析步时间。

当  $e(x) \leq 5\%$  时, 表示选择的进给速度和下压速度符合要求。当进给速度小于  $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 动态响应误差分布在 5% 以下, 因此, 设置进给速度分别为 6、7、8、9 和  $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  进行仿真模拟, 目标半径为 40 mm。

进给速度对成形半径的影响如图 12a 所示。仿真结果显示: 成形半径最大时为 40.96 mm, 对应的进给速度为  $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 成形半径最小时为 39.37 mm, 对应的进给速度为  $6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。显然, 随着进给速度的增大, 壁板成形半径随之增大, 这是因为进给速度变快会导致辊子与壁板接触时间变短, 滚弯过程中应力的积累变少, 产生塑性变形的时间变少, 最终导致成形半径增大。

滚弯前筋条宽度为 6 mm, 进给速度对筋条变形量的影响如图 12b 所示, 随着进给速度的提高, 横筋和纵筋变形量均有所下降。这是因为进给速度提高会导致壁板滚弯成形过程中的惯性力提升, 这对筋条变形有一定的抵抗作用。但是, 变形量减少的

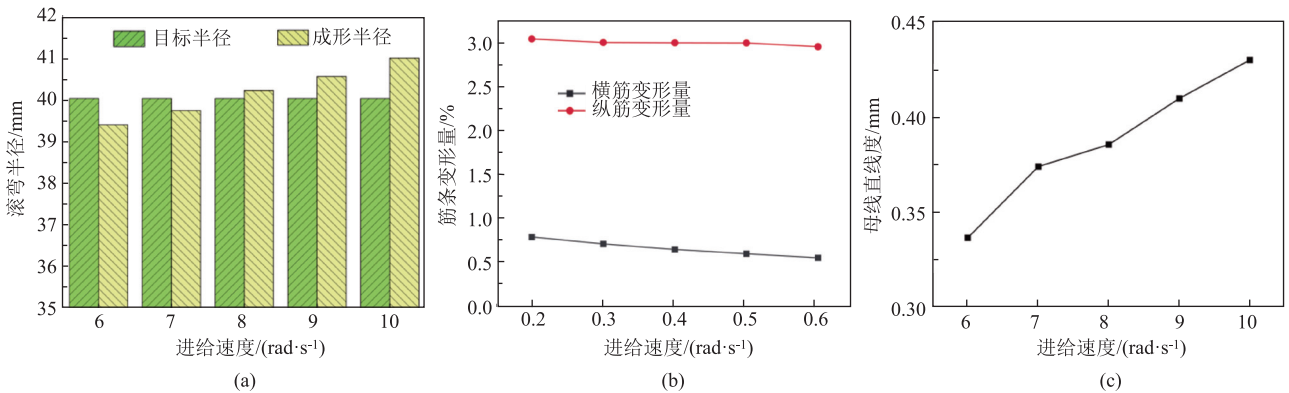


图 12 进给速度对成形质量的影响

(a) 成形半径 (b) 筋条变形量 (c) 母线直线度

Fig. 12 Influence of feeding speed on forming quality

(a) Forming radius (b) Deformation amount of rib (c) Busbar straightness

程度小,横筋变形量仅相差 0.23%,纵筋变形量仅相差 0.09%。

进给速度对母线直线度的影响如图 12c 所示,随着进给速度的增大,母线直线度也随之增大。这是因为随着进给速度的提高,辊子对壁板的作用力在时间维度上的分布不均。辊子来不及将作用力传递到壁板的各个部分,导致母线直线度增大。

综上所述,随着进给速度从  $6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  提高至  $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,整体网格壁板成形半径增大了 4.03%,横筋变形量减小了 0.23%、纵筋变形量减小了 0.09%,减小程度较小,而母线直线度增大了 27.57%。因此,进给速度越快,整体网格壁板滚弯成形质量越低。在实际生产中要综合考虑加工效率和成形质量选择合适的进给速度。

### 3.3 筋宽厚比对成形质量的影响

筋宽厚比即为筋条宽度和筋条高度的比值,为了研究筋宽厚比对壁板滚弯成形质量的影响,分别取筋宽厚比为 2、3 和 4,每种筋宽厚比根据筋高的不同分为 3 组,具体尺寸如表 5 所示。

表 5 不同筋宽厚比的具体尺寸 (mm)

Table 5 Specific dimensions for different width-to-thickness ratios of rib (mm)

筋宽厚比	2			3			4		
筋高	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
筋宽	2.0	3.0	4.0	3.0	4.5	6.0	4.0	6.0	8.0
板厚	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5

将不同筋宽厚比尺寸代入有限元模型中进行分析,目标半径为 40 mm。筋宽厚比对成形半径的影响如图 13a 所示。随着筋宽厚比的增加,壁板成形半径减小,并且成形半径与目标半径的平均成形误差减小。这是因为筋宽厚比的增加使筋条与辊子接触面积增加,更有利于弯矩的传递,导致成形半径减小。

筋宽厚比对于筋条变形量的影响如图 13b 和图 13c 所示。随着筋宽厚比的增加,横筋以及纵筋变形量均会减少。这是因为筋宽厚比增加会导致筋条截面惯性矩增加,使筋条所受应力减小,从而使筋

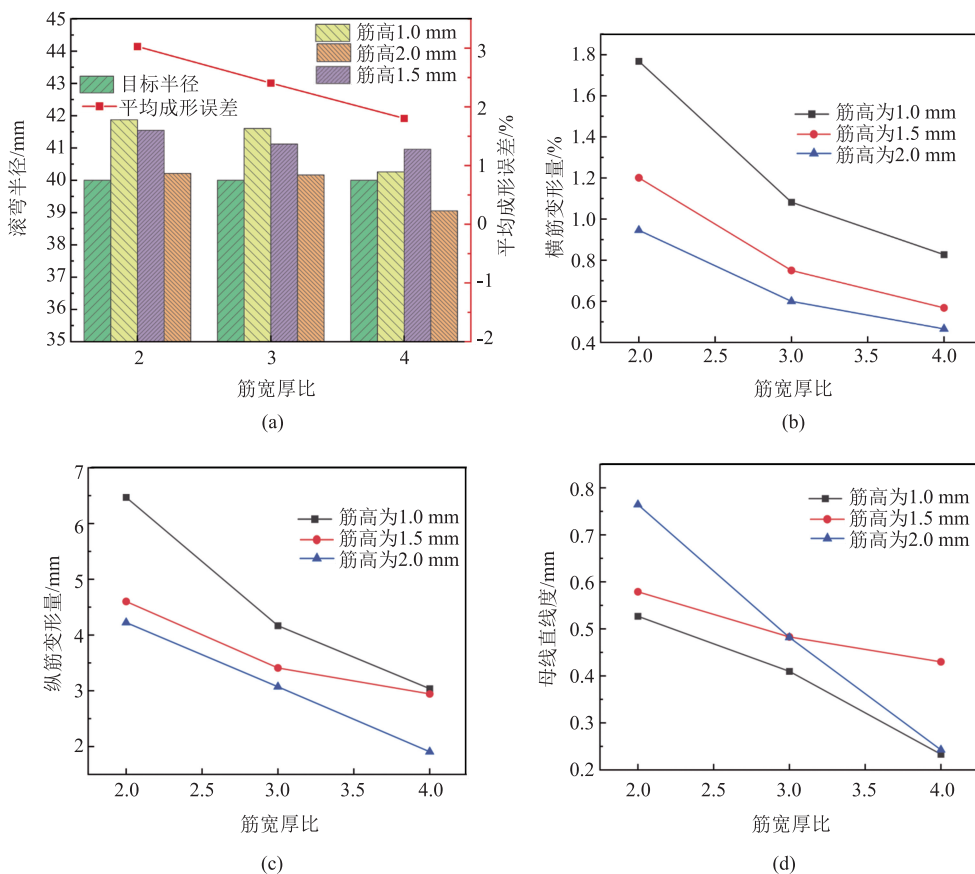


图 13 筋宽厚比对成形质量的影响

(a) 成形半径 (b) 横筋变形量 (c) 纵筋变形量 (d) 母线直线度

Fig. 13 Influence of width-to-thickness ratio of rib on forming quality

(a) Forming radius (b) Deformation amount of transverse rib (c) Deformation amount of longitudinal rib (d) Busbar straightness

条变形量减小。

筋宽厚比对母线直线度的影响如图 13d 所示。随着筋宽厚比的增加，母线直线度减小。这是因为随着筋宽厚比增加，壁板对滚弯成形中产生的非均匀变形的抵抗增强，筋条在滚弯成形中所受应力分布会更加均匀，从而改善了母线直线度。

综上所述，随着筋宽厚比从 2 提高至 4，整体网格壁板的滚弯半径平均成形误差减小了 1.22%、平均横筋变形量减小了 0.68%、平均纵筋变形量减小了 2.47%、平均母线直线度减小了 49.9%。因此，筋宽厚比越高，整体网格壁板滚弯成形质量越高。在实际生产中，筋宽厚比过大不利于壁板轻量化要求。因此，要综合考虑轻量化要求以及成形质量，针对不同的使用场景选择合适的筋宽厚比。

4 实验验证

为了验证有限元模型的可靠性，需要对其进行

实验验证。实验材料尺寸参数如表 5 所示，实验所用三辊卷板机如图 14 所示。滚弯前以及滚弯后整体网格壁板实物如图 15 所示，从左至右筋宽厚比依次为 2、3、4。实验完成后使用游标卡尺测量成形半径以及筋条变形量，使用母线尺以及塞尺测量母线直线度，如图 16 所示。经测量最终获得实验数据以及误差如表6所示。随着筋宽厚比从2提高至 4，整体

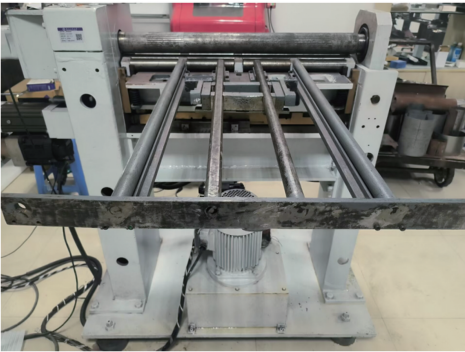


图 14 滚弯实验的三辊卷板机  
Fig. 14 Three-roll coiler for roll bending experiment

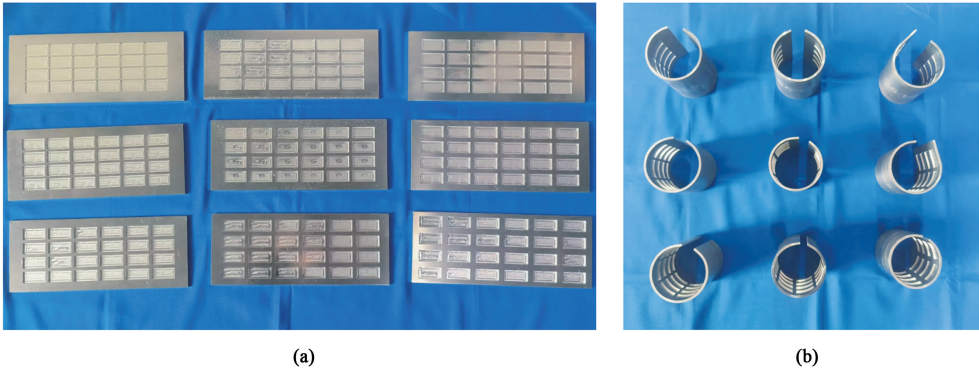


图 15 滚弯前 (a) 和滚弯后 (b) 的实物图  
Fig. 15 Physical pictures before roll bending (a) and after roll bending (b)

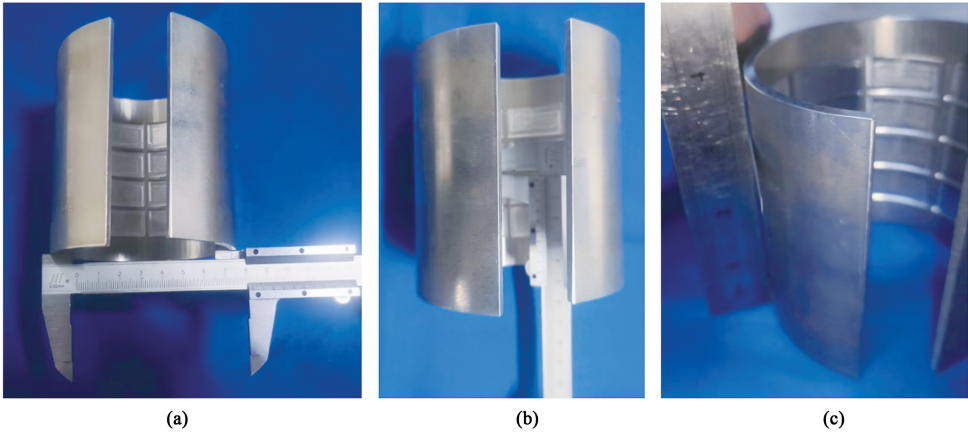


图 16 实验数据测量  
(a) 成形半径 (b) 筋条变形量 (c) 母线直线度  
Fig. 16 Experimental data measurement  
(a) Forming radius (b) Deformation amount of rib (c) Busbar straightness

表 6 实验数据及误差  
Table 6 Experimental data and errors

筋宽厚比	2			3			4		
筋高/mm	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
成形半径/mm	41.35	40.95	40.65	41.14	40.4	39.35	40.69	40.3	39.18
仿真与实验误差/%	1.27	1.46	1.08	1.13	1.79	2.07	1.06	1.64	0.32
滚弯半径平均成形误差/%	2.46			1.83			1.43		
横筋变形量/%	3.00	2.33	2.50	1.67	1.33	1.17	1.25	0.83	0.88
仿真与实验误差/%	1.23	1.13	1.55	0.59	0.58	0.57	0.42	0.26	0.41
纵筋变形量/%	3.50	3.67	5.25	3.33	2.44	2.50	2.25	1.67	1.88
仿真与实验误差/%	2.97	0.93	1.03	0.84	0.97	0.57	0.79	1.27	0.03
母线直线度/mm	0.56	0.55	0.72	0.44	0.45	0.455	0.25	0.4	0.26
仿真与实验误差/%	5.93	5.24	6.15	6.89	7.29	5.80	6.68	7.48	6.69

网格壁板的滚弯半径平均成形误差减小了 1.9%、平均横筋变形量减小了 1.63%、平均纵筋变形量减小了 2.21%、平均母线直线度减小了 50.66%。实验数据符合有限元模拟结果和规律，仿真与实验最小误差为 0.03%，最大误差为 7.48%。因此，有限元模型是合理的、可靠的，对于实际生产具有一定的指导作用。

5 结论

(1) 基于整体网格壁板滚弯成形原理，建立了上辊下压量与滚弯半径的数学模型，将其代入目标半径为 40 mm 的有限元模型进行计算，最终预测成形半径与目标半径误差不超过 2.4%，验证了数学模型的可靠性。

(2) 通过整体网格壁板滚弯成形有限元模型模拟分析，发现随着摩擦力以及进给速度的增加，滚弯成形质量降低；随着筋宽厚比的增加，滚弯成形质量提高。

(3) 对有限元模型进行实验验证，实验数据与有限元模型拟合度较高，仿真与实验误差不超过 7.48%，证明了有限元模型的可靠性和合理性。

参考文献：

[1] 李瀚伟. 大型铝合金整体网格壁板滚弯成形中填料作用研究 [D]. 合肥：中国科学技术大学，2022.  
Li H W. Study on the Effect of Filler in Roll Bending of Large Aluminum Alloy Integral Panels [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.

[2] 曹庚顺，胡春晓，黄永坚. 俄罗斯飞机整体壁板成形技术 [J]. 航空科学技术，1995 (6)：28-30.  
Cao G S, Hu C X, Huang Y J. Russian aircraft monolithic wall

plate forming technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 1995 (6)：28-30.

[3] 刘劲松，许沂，张士宏，等. 整体壁板增量压弯过程应力应变模拟 [J]. 塑性工程学报，2003，10 (5)：42-45.  
Liu J S, Xu X, Zhang S H, et al. Finite element simulation of stress and strain on the incremental bend forming techology of the intergral wing-skin panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10 (5)：42-45.

[4] 唐鑫森，江剑成，胡永祥. 带筋壁板筋条双侧激光喷丸弯曲变形特性 [J]. 塑性工程学报，2023，30 (9)：180-187.  
Tang X S, Jiang J C, Hu Y X. Bending deformation characteristics of stiffener plate of double-sided laser peen forming of stiffener [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (9)：180-187.

[5] 周贤宾，常和生，陈爱雅，等. 带筋壁板的时效应力松弛校形 [J]. 航空制造工程，1998 (5)：19-20，3.  
Zhou X B, Chang H S, Chen A Y, et al. Ageing stress relaxation calibration of reinforced wall plates for molding of Russian aircraft monolithic wall plates [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 1998 (5)：19-20，3.

[6] Xiao H, Zhang S H, Liu J S, et al. Experimental and numerical investigation on filling roll bending of aluminum alloy integral panel [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134 (6)：10111-10117.

[7] 肖寒，刘劲松，程明，等. 铝合金整体壁板橡胶填料辅助滚弯成形试验研究 [J]. 轻合金加工技术，2009，37 (6)：52-55.  
Xiao H, Liu J S, Cheng M, et al. Research on formability of rubber filling roll bending process of integral panel skins [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37 (6)：52-55.

[8] 肖寒，刘劲松，张士宏，等. 筋条外置整体壁板填料滚弯成形工艺研究 [J]. 材料工程，2010 (8)：56-60.  
Xiao H, Liu J S, Zhang S H, et al. Research on filling roll bending process of integral panel skins with rib-outward [J]. Journal of Materials Engineering, 2010 (8)：56-60.

[9] 肖寒，刘劲松，张士宏，等. 塑料辅助网格式整体壁板滚弯成形实验研究 [J]. 塑性工程学报，2009，16 (4)：17-20.

(下转第 85 页)